

УДК 621.373:519.2:535

В.С. Деева¹, С.М. Слободян¹, М.С. Слободян²¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НАВЕДЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Потенциальные возможности оптических и лазерных технологий открывают широкие перспективы эффективного их использования в промышленности и многих областях науки и техники. Большая помехоустойчивость, вследствие высокой направленности и монохроматичности излучения, является основой важных преимуществ оптических, лазерных и светодиодных систем. Однако известные преимущества оптических квантовых генераторов и современных новых источников оптического излучения, такие как, остро направленное электромагнитное излучение большой интенсивности с весьма высокой степенью монохроматичности, при решении ряда задач, например, при создании мобильных и высокоточных систем приводят к появлению некоторых затруднений применения достижений современной лазерной технологии. В первую очередь, это связано с тем, что, чаще всего, искомые объекты, предназначенные для лазерного наблюдения и взаимодействия с системой, являются подвижными или динамическими. Другими словами, искомые объекты являются кратковременными или появляются в более широком поле наблюдения, чем размер лазерного пучка системы. Поэтому, из-за малой угловой расходимости ограниченного в пространстве светового и лазерного пучка, затрудняется обнаружение искомого динамического объекта наблюдения. Этот фактор существует во всех оптических, светодиодных, оптико-электронных и лазерных системах различного назначения. Для исключения действия этого фактора в лазерных системах применяют процедуру сканирования узким лазерным пучком широкого поля зрения, в котором предполагается нахождение объекта. Поле зрения, в пределах которого следует обнаружить искомый объект, и время поиска являются важными характеристиками лазерных систем в режиме обнаружения объектов. Для увеличения поля поиска объекта лазерные системы устанавливают на многокоординатные динамические платформы. В статье проведён анализ предложенной модели виртуальной многокоординатной динамической платформы. Программным подходом и методом компьютерного моделирования исследована возможность её применения для увеличения поля зрения лазерной системы наведения объекта. Приведены закономерности изменения некоторых характеристик платформы, полученные компьютерным моделированием. Данные моделирования находятся в хорошем согласии с теоретическими результатами и выборками эксперимента.

Ключевые слова: метод, моделирование, эффективность, динамическая платформа, модель, оценка, грубое наведение, лазер, управление, пространство, система наведения, слежение.

V.S. Deeva¹, S.M. Slobodyan¹, M.S. Slobodyan²

¹Omsk State Technic University, Omsk, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

ESTIMATION OF DYNAMIC PLATFORM FOR GUIDANCE OF LASER SYSTEM BY SIMULATION

The performance potential of optical and laser technologies offers the great challenge of using them in many industries and areas of science effectively. High interference immunity due to precise directionality and monochromatic radiation is the important benefit of the optical, laser and LED systems. However, the predominant features of the optical and laser amplifiers, and today's optical emission source, lead to some trouble. For example, high intensity precise directional electromagnetic radiation is factored into the test program with the use of a portable high-precision system. The most significantly factor is that laser targeting is used for the detection and tracking of dynamic objects of any shapes. However, the moving objects are the short-term objectives or are positioned in the field of vision wider than the laser beam size. Therefore, marginally angular spreading of the light and laser beam makes difficult the detection and tracking of moving objects. This phenomenon is observed in optical, LED, optoelectronic and laser systems for various purposes. In order to eliminate this factor, the laser beam scanning across the field of vision is used most often. The field of vision, in which the moving object is located, and scan time are two of the main criteria for detection and tracking of objects by laser systems. To expand the field of vision the laser systems is installed in multimotion control platform. In this paper we propose a model of a four degree-of-freedom motion platform. Also we investigate, using computational modeling and simulation, the potential of the multimotion platform to expand the field of vision of the laser systems and we receive influence from other variables. With the aid of computer modeling, it is verified that simulations agree with theory and experimental data.

Keywords: method, simulation, efficiency, dynamic platform, model, estimation, rough guidance, laser, control, space, guidance system, tracking.

Введение. Оптические и лазерные автоматические системы, выполняющие сначала сканирование поле пространства наблюдения для обнаружения в нем искомого объекта с последующим переходом в режим слежения за его перемещением, в наибольшей мере соответствуют автоматическим средствам контроля состояния пространства наблюдения [1–35]. Принципиальная особенность автоматических систем [1–4, 18–25]: необходимость осуществления процедуры обнаружения искомого объекта на начальном этапе работы. Это определяет их способность к переходу в режим слежения, контроля и управления объектом и процессом. Поэтому для такого типа прецизионных лазерных и светодиодных систем важно решение проблемы обеспечения наибольшей эффективности на начальном этапе работы, именуемом [1, 3–14] режимом поиска и обнаружения. Требования к режиму поиска и обнаружения характеризуются [1, 3–18, 20–25] целью достижения наилучших вероятностных показателей обнаружения при наивысших значениях чувствительности, помехозащищенности, точности, быстродействия

и устойчивости. В конечном итоге эффективность лазерных систем поиска определяется качеством их реализации и степенью оптимизации их параметров для решаемой задачи. В настоящее время высокую актуальность приобрели задачи контроля канала наблюдения и управления объектами, многомерной диагностики параметров и компенсации искажений изображения или волнового фронта лазерного излучения, принимаемого системой, в условиях воздействия турбулентности и мощного электромагнитного излучения на канал наблюдения и управления объектами. Для увеличения размеров поля наблюдения объектов для осуществления процедуры их поиска лазерные системы устанавливают на управляемые динамические платформы [1–2, 4–14, 22, 25–34]. Подобная необходимость существует и в области контактной сварки ответственных элементов атомной энергетики [36]. Принципиально динамические платформы могут быть конструктивно выполнены на широком спектре номенклатуры элементов и устройств, использующих различные физические принципы, лежащие в основе их функционирования как электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов [1–2, 4–14, 22, 25–34]. Платформы как силовые узлы предназначены для перемещения в пространстве технического оборудования, динамические платформы часто выполняют на элементах, в основу работы которых положены фундаментальные базовые принципы пьезоэлектричества и электромагнетизма, а также принципы электрических и электромеханических физических явлений. При этом обычно используют явления, основанные на действии электрических и магнитных полей, возникающих при протекании электрического тока управления состоянием элементов исполнения отдельных приводов многокоординатных платформ.

Ниже для предварительной оценки способности программного подхода как имитатора решения такой задачи, использующей обобщенное представление структурных схем компоновки известных типов, в том числе отечественных динамических платформ, исследована возможность применения для грубого наведения лазерной системы на объект многокоординатной динамической платформы [27–32].

Цель исследования включала разработку векторного типа микропроцессорной (МП) электромеханической системы управления подвижной платформой с лазерной системой наведения на базе рекомендованных операционной средой известных средств разработки встроенного программного обеспечения серии процессоров Texas Instruments

[15–17, 35]. Основа Simulink [38] использована при этом как средство для проектирования и имитации работы динамических систем.

Важнейшим направлением развития имитационных средств и устройств является разработка новых принципиальных решений построения программных, алгоритмических и компьютерных средств имитации того или иного процесса в системе, позволяющих более рационально решать задачи, связанные с имитацией и представлением этого информационного или физического процесса.

Задача сильно усложняется, когда в комплексе имитации приходится использовать виртуальное представление первичной информации разной физической природы. Это усложнение объясняется тем, что первичные преобразователи с различными принципами действия информационный сигнал о состоянии объекта наблюдения преобразуют в разные значения существенно отличающихся друг от друга параметров идентификации состояния объекта. По этой причине вопрос создания простых и надёжных средств и алгоритмов имитации процессов функционирования систем, обладающих при этом достаточной точностью отражения реальности при высоком быстродействии формирования имитирующего процесс или систему сигнала, до сих пор остаётся актуальным.

В качестве фактора, комплексно объединяющего разнородные преобразователи информации и разные системы, используется их математическое описание, учитывающее с наибольшей полнотой действие всех физических принципов, используемых для получения объединяемых в имитируемом средстве информационных сигналов и систем. Другими словами, для качественной программно-аппаратной имитации необходимо наличие адекватных реальности математических моделей процессов и систем [1, 35–42].

Ниже на виртуальном примере действия платформы по одной из координат (x ; y ; z ; v ; t) или по углу места, азимуту, скорости движения и т.п.) измерительной системы пространства наблюдения лазерной системой подвижного объекта проведён анализ возможности практического функционирования программного имитатора обобщённого типа динамической платформы с лазерной системой. На базе стандартных [1, 15–17, 36–42] компьютерных программных средств (например: Simulink, MatLab, протоколов обмена Ethernet, среды разработки встроенного программного обеспечения для сигнальных процессоров)

в среде Windows разработаны математические и компьютерные модели отдельных типов приводов, включая модели оригинальных пьезоприводов многомерного управления [26–32], для виртуального комплекса программной имитации работы динамической платформы. С применением части некоторых оригинальных наработок выполнено имитационное моделирование функционирования платформы в разных режимах виртуального её действия.

Современные имитаторы поведения динамических процессов и объектов обладают сложной структурой. Структурно для лазерных систем поиска и наведения они используют [36–42] многоуровневый программно-аппаратный комплекс. Их совершенствование ведёт к заметному ужесточению требований к качественным показателям лазерных и оптических следящих систем, таким как точность, быстродействие и т.п. Для оценки эффективности выполнения поставленных требований к лазерным системам подход имитационного моделирования с использованием программных методов часто оказывается наиболее привлекательным.

Подобного рода система может быть реализована на основе привода для имитации влияния среды на деформирование волнового фронта излучения от подвижного объекта во время его движения. Другой вариант исполнения имитационного моделирования – с использованием принципа частотного управления действием электромеханического привода слежения за траекторией движения объекта на малой, с меньшей инерционностью, платформе с учетом вариаций динамических режимов движения объекта наблюдения. Во многих случаях реализация принципа разделения движений [1, 35] приводит к улучшению качества следящих систем более простым способом, а иногда и единственно возможным.

При проведении исследований методом программного имитационного моделирования желательно, чтобы лазерная система обнаружения и наведения объекта как управляющее устройство могла активно изменять параметры системы и поддерживать её характеристики на требуемом качественном уровне. Этот уровень должен быть максимально приближен к теоретически предельно возможному или оптимальному.

Следуя требованиям, сформулируем задачи, программно решаемые имитатором грубого наведения, в следующей исследовательской постановке:

– формирование и исполнение сигналов задания скорости и ускорения по осям вращения динамической платформы должно проводиться с учетом спектра влияния меняющегося внешнего возмущения;

– процедура моделирования учитывает вероятность возникновения скачков моментов инерции ввиду несовершенства механической системы;

– динамическая платформа должна обеспечивать двойную перегрузку воздействия по моменту исполнительного привода, в частном случае двигателя;

– работа исполнительного привода допускает кратковременное поддержание момента на заданном или требуемом уровне от его номинального значения.

Характерной особенностью функционирования лазерных систем поиска, обнаружения и управления объектами здесь является при изменении управляющего или возмущающего воздействия пространственно обусловленное перекрёстными связями [1, 14] взаимовлияние автономных координатных приводов. Эта проблема особенно актуальна в реальной работе лазерной системы с большим моментом инерции и высокой динамикой движения искомого объекта управления. Проблема важна, поскольку целью управления лазерной системой наведения является слежение за перемещением и наведение объекта управления по заданной траектории при действии возмущений как со стороны объекта, так и со стороны внешней среды. Другими словами, управление проводится с целью наиболее строгого выполнения установленного технологического процесса. При этом, по возможности, следует исключать внешние межкоординатные перекрёстные возмущения, обусловленные динамическими нагрузками, вызванные действиями подвижного объекта при выполнении процесса лазерного наведения [20–34].

Аппаратная часть виртуально моделируемой системы может быть представлена в виде обобщенной структуры динамической платформы с многокоординатным прецизионным приводом. Её обобщенная структура разработана на основе информации разработчиков ряда динамических платформ (серии DP, Муромского радиозавода и др.), принципы функционирования которых подробно изложены в широко известных библиографических источниках. В большинстве современных практически созданных в промышленности многокоординатных динамических платформ применяют как базовый автономный тип частотно-

управляемого электропривода, обычно выполняемого в связке «преобразователь частоты – асинхронный двигатель». В нашем случае для обеспечения прецизионности управления мы используем в цепи контуров управления параметрами лазерного пучка системы модели пьезообразователей [1–9, 22, 26–34] как часть автономных приводов динамической платформы.

Для грубого наведения лазерных систем целесообразно построение приводов по принципу автономности вложенных контуров оценки и управления. Принцип автономности вложенных контуров предусматривает распределение приоритета действия сигналов контуров оценки состояния измеряемых параметров, вкуче составляющих общую оценку состояния системы для формирования соответствующих сигналов управления её состоянием. Распределение приоритета действия контуров управления основано на привлечении весового или равноценного ранжирования сигналов, формируемых в контурах управления системой. В этом подходе сущность принципа распределения приоритета состоит в первоначальном весовом ранжировании контуров с дальнейшим принятием алгоритма формирования по данным индивидуальной оценки состояния каждым из контуров сигнала результирующего управления состоянием всей системы грубого наведения лазерной системы. Например, возможно применение [1, 13–14, 28–30] алгоритма «матрёшки» – аддитивного сложения ошибок состояния контуров. Согласно сущности этого алгоритма [1, 28–30] в контуре с низшим приоритетом выделяется ошибка по моменту, которая затем вводится аддитивно в управляющее воздействие привода второй координаты как дополнительная составляющая. Следуя логике алгоритма матрёшки, ошибка, выделенная в младшем по рангу приоритета i -м контуре, аддитивно подается в ближайший старший по рангу приоритета $(i+1)$ -й автономный контур. Другими словами, каждый младший контур вложен в ближайший старший контур, а общий контур управления системой является аддитивной структурой автономных контуров, составляющих систему наведения (структура «матрёшки»). Принцип построения системы грубого наведения по алгоритму «матрёшка» многокоординатной [1, 26–33] системы приводов подобен созданию структуры комплексного N -координатного привода в виде известного в кибернетике построения системы подчиненного регулирования. В системах подчиненного регулирования требуемая для управления характеристика каждого i -го контура формируется как одиночная, автономная.

Принцип подчиненного управления широко используется в моделировании систем и физических процессов. Создание многокоординатных систем управления на основе принципа «матрёшки» с вложенными в неё автономными контурами имеет свои, определяемые свойствами конкретной системы наведения, особенности. Принцип «матрёшки» и прост, и сложен. В настоящее время он активно развивается и исследуется. Одна из особенностей принципа «матрёшки» определена тем, что корректирующий i -ю координату сигнал в следующую $(i+1)$ -ю координату подается с предшествующей координаты, причем отличающейся по физической трактовке координаты параметра управления. Принцип «матрёшка» как подход управления относит многомернокоординатную структуру приводов [1, 26–33] к классу адаптивных систем с присущими этому классу формами инвариантности.

Приведём некоторые особенности моделируемой структуры:

- степень приоритета и вес ранга контура определяются принципом функционирования лазерной системы наведения и условиями решаемой задачи;

- ранг приоритета координат учитывает их ортогональность в принятой системе координат работы лазерного средства наведения;

- низший по рангу контур управления является автономным;

- согласно принципу «матрёшка» учитывается, что i -я координата является аргументом, а вторая $(i+1)$ -я – его функцией независимо от метода разложения траектории управления на управляющие функции (независимые, параметрические и т.п.);

- математические процедуры определения координат параметров и соответствующей оценки состояния контуров управления и системы наведения в целом для формирования сигналов для каждого отдельного контура управления лазерного средства наведения как «матрёшки» реализуются программным путём.

Кратко приведём вариант аналитического описания математической модели структуры с точки зрения реализации отработки аддитивных составляющих ошибки наведения в процессе математического моделирования. Размещение лазерной системы обнаружения на динамической платформе существенно расширяет пространство поиска подвижного объекта путём осуществления процедуры грубого её наведения на траекторию движения объекта. Лазерная прецизионная система на платформе становится электромеханической следящей

системой, в общем смысле, предназначенной для преобразования входного воздействия в перемещение инерционной нагрузки. Структура лазерной прецизионной системы на динамической платформе будет соответствовать обобщённой структуре системы автоматического управления. Обозначим: $W(p)$, $T(p)$ – передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям координатных приводов; p – оператор Лапласа; индексы x, y, z – обозначения координат наблюдения в измерительной системе и системе управления; \mathbf{M} – вектор управления, определяющий особенности траектория движения лазерной системы наведения при работе с объектом; \mathbf{N} – вектор возмущений, включая шумы приводов и лазерной системы наведения. Устройством формирования управляющего воздействия являются компьютер, МП-структура или специальный процессор управления. Другие обозначения, применяемые в описании и формализации математической модели, пояснены ниже.

Ошибка $\Delta(p)$ оценки невязки-рассогласования состояния координат параметра каждом отдельном (сепаратном) контуре управления определяется через передаточные функции этого контура:

$$\Delta(p) = \frac{1}{1+W(p)}m(p) + \frac{V(p)}{1+W(p)}n(p), \quad (1)$$

$$W(p) = A(p)/B(p), \quad (2)$$

$$V(p) = C(p)/D(p), \quad (3)$$

где $A(p)$ и $B(p)$, $C(p)$ и $D(p)$ – соответствующие полиномы описания передаточных функций: $W(p)$ – по управлению и $V(p)$ – по возмущению рассматриваемого сепаратного контура «матрёшки».

Учтя в (1) представление полиномами (2) и (3), выражение ошибки рассогласования состояния сепаратного контура может быть представлено в виде

$$\Delta(p) = \frac{B(p)}{A(p)+B(p)}m(p) + \frac{B(p)V(p)}{A(p)+B(p)}n(p). \quad (4)$$

Заменив $A(p) + B(p) = E(p)$ и $K(p) = B(p) \cdot V(p)$ для упрощения соотношения (4), получим:

$$\Delta(p) \cdot E(p) = B(p)m(p) + B(p) \cdot V(p)n(p). \quad (5)$$

Математическая формализация, анализ и оценка многомернокоординатной системы являются весьма громоздкими. Поэтому их рассмотрение и описание в излагаемой работе в дальнейшем ввиду громоздкости опустим.

Процедура адаптации управляющего воздействия низшего i -го ранга и последующей $(i+1)$ -й координаты выполняется согласно физической и логической сущности реализации принципа «матрёшка». Напомним, выше принята функциональная независимость способа закономерности разложения траектории управления на составляющие функции (младшая i -я координата принимается как аргумент, а соседняя $(i+1)$ -я – как старшая его функция. Это позволяет предположить возможность, в частном случае, трёх вариантов коррекции ошибок как управляющих воздействий для сепаратных координатных приводов:

- формирование и введение собственных компонентов в каждом сепаратном контуре;

- принятие иерархической итерационной структуры как в части понимания системы, так и в части отработки ошибок по возмущению, включая внутренние факторы. Такой подход допускает, в отличие от классических систем итерационных процедур, введение ошибки предыдущего контура «матрёшки» непосредственно в управляющее воздействие, а не в последующий контур;

- чёткое выполнение принципа функционирования многокоординатной системы по алгоритму логики «матрёшки».

В последнем варианте в каждом предыдущем сепаратном контуре управления (или в предыдущей совокупности контуров) процедура настройки по ошибке возмущения считается завершённой, а остаточная ошибка, не скомпенсированная в этом контуре (или совокупности контуров) от случайного временного возмущения, поступает в следующий по рангу контур. При этом каждый последующий контур охвачен обратной связью по возмущению предшествующей координаты. По этому варианту структурная схема многомерной системы управления может быть представлена системой сепаратного описания (1)–(5) передаточных функций. Структура алгоритма реализации системы также зависит от функции изменения управляющего воздействия. Заметим, что формирование управляющих сигналов – в некоторой степени также функция изменения возмущений. В общем случае управляющий

сигнал в среднем является интегральной, часто нелинейной квадратичной функцией соответствующих компонентов (статической δ_c , инерционной $\delta_{ин}$, динамической δ_d , вероятностной δ_v и т.п.) ошибки, определяющей качество управления.

При моделировании в качестве объекта управления принята подвижная динамическая платформа с k степенями свободы. Управление динамической платформой построено на базе протоколов Ethernet и осуществляется встроенным компьютером по локальной сети. Таким образом решалась задача разработки программной реализации МП-средства управления лазерной системой наведения на базе широко известных аппаратно-программных средств [36–42].

Для иллюстрации особенностей функционирования программной виртуальной реализации имитатора электромеханического средства грубого наведения лазерной следящей системы ниже представлены результаты моделирования с двукратной (по номинальному уровню) инерционной нагрузкой элементарного старт-стопного тактового пуска в движение платформы и единичного скачка нагрузки в случайный момент времени на траектории установившегося движения платформы (тест единичного скачка, обработка возмущения типа действия функции Хевисайда) (рис. 1, 2).

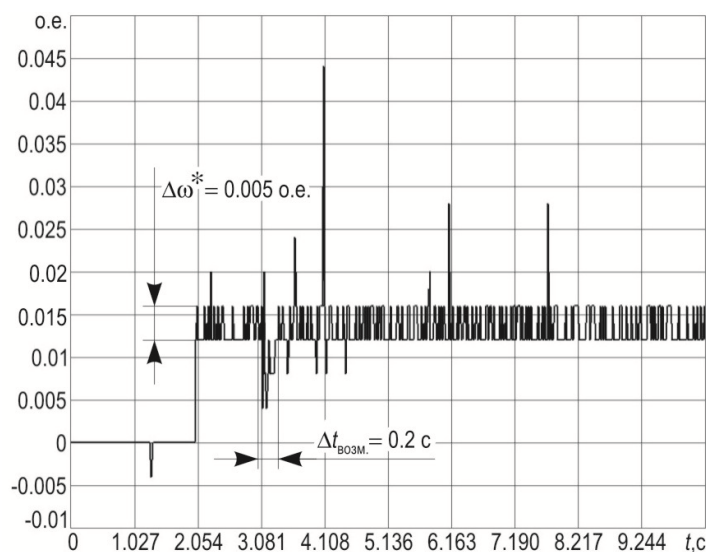


Рис. 1. Типичное поведение динамической платформы при старт-стопном пуске с двойной инерционной нагрузкой

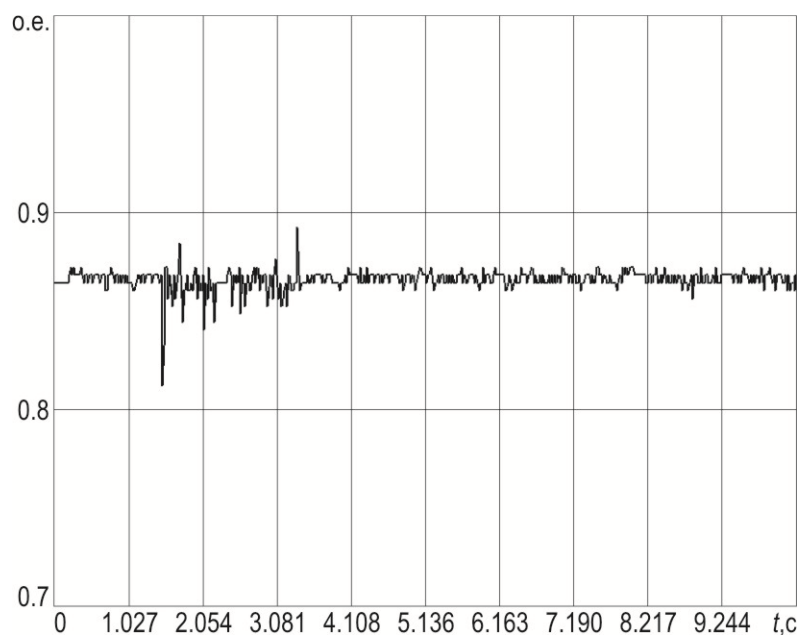


Рис. 2. Типичный переходный процесс по возмущению при движении платформы в случайный момент приложения двойной нагрузки

Обобщим результаты проведённого исследования и оценки эффективности решения задачи увеличения размера поля наблюдения объектов путём комплексирования лазерной системы с многомерной электромеханической динамической структурой как средства поиска и обнаружения подвижных объектов. Программная имитация работы грубого наведения комплексированного средства с осуществлением процедуры поиска объектов лазерной системой, установленной на управляемую динамическую платформу, показала результаты, подтверждающие положительность решения задачи. Существенное преимущество программной имитации решения изложенной задачи заключается в неограниченной возможности процедуры имитационного моделирования практически с полным учетом оригинальности подхода, высокой сложности аналитического описания многомерной и многофакторной структуры средства с высокой степенью коррекции составляющих ошибок наведения системы по принципу «матрёшка», подобному алгоритму дихотомного разложения [1].

При моделировании комплексированной лазерной системы с электромеханической динамической платформой с учётом оценки влияния дополнительного возмущения выявлено повышение на единицу степени

астатизма сепаратного контура для платформы с исполнительным электроприводом, передаточная функция которого по управлению имеет астатизм первого порядка, а по возмущению – нулевого. При этом статическая ошибка, обусловленная выявленным фактором дополнительного возмущения, стремится к нулевому значению. Усреднение невязок, обусловленное наличием интегрирующего звена в перекрестной обратной связи, также на единицу повышает порядок астатизма для этой компоненты сигнала управления. Анализ результатов показал, что выявленные при моделировании особенности существенно не изменяют свойств внутренних сепаратных контуров моделируемого электромеханического привода динамической платформы.

Таким образом, в работе показана возможность программной реализации векторной системы управления комплексированным лазерно-электромеханическим средством на примере имитации грубого наведения по одной из координат движения динамической платформы с лазерной системой наведения в режиме поиска и обнаружения объекта. Алгоритм управления по принципу «матрёшка» учитывает: влияние моментов инерции при выдаче задания скорости и ускорения; исполнение задания скорости и ускорения по осям вращения динамической платформы, с учетом разнопланово меняющихся условий, обеспечивает двукратную перегрузочную способность по моменту исполнительного привода. Кроме того, алгоритм управления обеспечивает разгон, замедление, торможение вариацией параметров возбуждения привода и контроль границ поля поиска пространства наблюдения при изменении углового положения динамической платформы.

Библиографический список

1. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. – Барнаул: Азбука, 2006. – 224 с.
2. Цупин А.А., Слободян С.М. Лазерные средства навигационного оборудования для ориентирования подвижных объектов. – М.: Мэйлер, 2013. – 166 с.
3. Деева В.С. Метод покрытия кластерного пространства наблюдения // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1, Ч. 1. – С. 253–258.
4. Слободян С.М., Цупин А.А. Многофункциональные визуально-инструментальные лазерные навигационные комплексы морского применения // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 5–3. – С. 102–103.

5. Деева В.С., Слободян С.М. Метод безопасного восприятия визуальной лазерной навигации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 5. – С. 64–70.
6. Слободян С.М., Цупин А.А. Интеллектуализация лазерного створа // Навигация и гидрография. – 2013. – № 36. – С. 38–44.
7. К вопросу об использовании лазерных средств навигационного оборудования при движении кораблей и судов по криволинейным траекториям / П.И. Малеев, С.М. Слободян, А.А. Цупин, В.А. Цупин // Морской вестник. – 2014. – № 3. – С. 75–77.
8. Слободян С.М. Лазерный створ дальнего действия для систем визуальной навигации // Датчики и системы. – 2015. – № 5. – С. 32–35.
9. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Успехи современной радиоэлектроники. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
10. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // Успехи современной радиоэлектроники. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
11. Слободян С.М. Метод фазового слежения в гетеродинном интерферометре контроля перемещений // Метрология. – 2004. – № 2. – С. 14–27.
12. Слободян С.М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 1. Поисковые траектории // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 6. – С. 40–46.
13. Слободян С.М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 2. Следящие микрорастры // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, № 1. – С. 40–46.
14. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
15. Большанин А.А., Слободян С.М., Яковлев А.Р. Линейный фотоприёмник с переменными параметрами // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 6. – С. 141–141.
16. Большанин А.А., Слободян С.М., Яковлев А.Р. Матричный фотоприёмник с переменными параметрами // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 6. – С. 142–142.
17. Большанин А.А., Слободян С.М., Яковлев А.Р. Многоэлементная система регистрации пространственного распределения

оптического импульса // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 1. – С. 176–177.

18. Деева В.С., Слободян М.С., Слободян С.М. Детектор двумерных смещений // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 5. – С. 166–167.

19. Слободян С.М., Шишигин С.А. Установка для создания и автоматической регистрации очагов оптического пробоя воздуха // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 3. – С. 162–163.

20. Measuring the distribution of radiation intensity in the cross section of a laser beam / V.I. Bukatyi, N.I. Mishchenko, S.M. Slobodyan, D.P. Chaporov // Instruments and Experimental Techniques. – 1976. – Vol. 19, № 2, pt. 2. – P. 513–515.

21. Slobodyan S.M., Galakhov V.N., Sazanovich V.M. Dissector follower system for angular fluctuation measurement of an optical beam // Instruments and Experimental Techniques. – 1980. – Vol. 23, № 4, pt. 2. – P. 1010–1012.

22. Lukin V.P., Sazanovich V.M., Slobodyan S.M. Random image shifts during ranging in a turbulent atmosphere // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1980. – Vol. 23, № 6. – P. 484–490.

23. Registration of a pulsed laser beam by a matrix of charge-coupled devices / V.F. Volkov, A.K. Peshel', S.M. Slobodyan, I.S. Tyryshkin // Instruments and Experimental Techniques. – 1981. – Vol. 24, № 6, pt. 2. – P. 1522–1524.

24. Sources measurement error of fast-flowing process parameters by charge-coupled devices / V.F. Arutyunov, V.A. Mel'nikov, S.M. Slobodyan, D.P. Chaporov, O.N. Popov // Measurement Techniques. – 1983. – Vol. 26, № 8. – P. 641–644.

25. Two-channel optical transducer for an industrial inspection system / A.A. Bol'shanin, S.M. Slobodyan., A.R. Yakovlev, L.A. Vasil'eva // Measurement Techniques. – 1987. – Vol. 30, № 10. – P. 954–956.

26. Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопривод // Датчики и системы. – 2003. – № 3. – С. 47–48.

27. Слободян М.С., Слободян С.М. Трехкоординатный пьезопривод // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 1. – С. 32–36.

28. Слободян С.М., Яковлев А.Р. Биморфный привод системы управления // Приборы и системы управления. – 1988. – № 5. – С. 51.

29. Слободян С.М. Триангуляционный алгоритм трехмерного перемещения зеркала управляемой оптической системы // Метрология. – 2003. – № 8. – С. 29–38.
30. Слободян С.М. Многомернокоординатный привод микроуправления // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, № 5. – С. 92–95.
31. Слободян М.С., Слободян С.М., Цупин А.А. Широкоформатный лазерный створ // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2007. – Т. 311, № 2. – С. 34–39.
32. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.A. Optical deflector of a wave-front tilt corrector // Journal Optical Technology. – 2008. – Vol. 75, № 5. – P. 301–305.
33. Большанин А.А., Слободян С.М., Яковлев А.Р. Самоорганизация лазерного «awl-sight» при наведении объекта // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 49–52.
34. Слободян С.М. Лазерный створ с контролем визуального восприятия // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 1. – С. 25–29.
35. Деева В.С., Слободян С.М. Метод повышения точности МП-датчиков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 2. – С. 46–47.
36. Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония: монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 108 с.
37. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
38. Дьяконов В.П. Simulink: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2013. – 784 с.
39. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 702 с.
40. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. – 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа БХВ, 2004. – 847 с.
41. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MatLab: учеб. курс. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа БХВ, 2005. – 512 с.
42. Морозов В.К., Рогачёв Г.Н. Моделирование информационных и динамических систем. – М.: Академия, 2011. – 384 с.

References

1. Slobodian S.M. Televizionnaia diagnostika lazernykh puchkov [Television diagnostics of laser beams]. Barnaul: Azbuka, 2006. 224 p.
2. Tsupin A.A., Slobodian S.M. Lazernye sredstva navigatsionnogo oborudovaniia dlia orientirovaniia podvizhnykh ob"ektov [Laser navigational equipment for the orientation of mobile objects]. Moscow: Meiler, 2013. 166 p.
3. Deeva V.S. Metod pokrytiia klasternogo prostranstva nabludeniia [Method of coating the cluster space of the observation]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2012, no. 1, part 1, pp. 253-258.
4. Slobodian S.M., Tsupin A.A. Mnogofunktsional'nye vizual'no-instrumental'nye lazernye navigatsionnye kompleksy morskogo primeneniia [Multifunctional visual-instrument laser navigation systems for naval use]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2009, no. 5-3, pp. 102-103.
5. Deeva V.S., Slobodian S.M. Metod bezopasnogo vospriiatii vizual'noi lazernoi navigatsii [Method safety visual sensor of laser alignment]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii*, 2013, no. 5, pp. 64-70.
6. Slobodian S.M., Tsupin A.A. Intellektualizatsiia lazernogo stvora [Intellectualization of laser range]. *Navigatsiia i gidrografiia*, 2013, no. 36, pp. 38-44.
7. Maleev P.I., Slobodian S.M., Tsupin A.A., Tsupin V.A. K voprosu ob ispol'zovanii lazernykh sredstv navigatsionnogo oborudovaniia pri dvizhenii korablei i sudov po krivolineinym traektoriiam [On the problem of the use of laser navigation equipment during ship movement along curvilinear trajectories]. *Morskoi vestnik*, 2014, no. 3, pp. 75-77.
8. Slobodian S.M. Lazernyi stvor dal'nego deistviia dlia sistem vizual'noi navigatsii [Far-sighted laser alignment of system visual guidance]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 5, pp. 32-35.
9. Slobodian S.M., Tsupin A.A. Lazernye navigatsionnye sistemy avtonomnykh transportnykh sredstv [Laser navigation systems for the guidance of self-controlled transport facilities]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 1988, no. 6, pp. 13-20.
10. Slobodian S.M. Dissektornye geterodinnye sistemy [Dissector heterodyne systems]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 1986, no. 6, pp. 62-72.

11. Slobodian S.M. Metod fazovogo slezheniia v geterodinnom interferometre kontroliia peremeshchenii [Method of phase tracking in the heterodyne interferometer of the control of displacements]. *Metrologiia*, 2004, no. 2, pp. 14-27.

12. Slobodian S.M. Analiz i optimizatsiia televizionnogo printsipa skanirovaniia fazovogo prostranstva opticheskim fazometrom: 1. Poiskovye traektorii [Analysis and optimization of the television principle of scanning phase space by the optical phasometer: 1. Search scan]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004. vol. 307, no. 6, pp. 40-46.

13. Slobodian S.M. Analiz i optimizatsiia televizionnogo printsipa skanirovaniia fazovogo prostranstva opticheskim fazometrom: 2. Slediashchie mikrorasty [Analysis and optimization of the television principle of scanning phase space by the optical phasometer: 2. Tracking microscan]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no 1, pp. 40-46.

14. Pustynskii I.N., Slobodian S.M. Dissektornye slediashchie sistemy [Dissector Tracking Systems]. Moscow: Radio i sviaz', 1984. 136 p.

15. Bol'shanin A.A., Slobodian S.M., Iakovlev A.R. Lineinyi fotopriemnik s peremennymi parametrami [Variable parameter unidimensional photodetector]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 6, pp. 141-141.

16. Bol'shanin A.A., Slobodian S.M., Iakovlev A.R. Matrichnyi fotopriemnik s peremennymi parametrami [Variable parameter matrix photodetector]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 6, pp. 142-142.

17. Bol'shanin A.A., Slobodian S.M., Iakovlev A.R. Mnogoelementnaia sistema registratsii prostranstvennogo raspredeleniia opticheskogo impul'sa [Multielement system of record of optical impulse space spreading]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2010, no. 1, pp. 176-177.

18. Deeva V.S., Slobodian M.S., Slobodian S.M. Detektor dvumernykh smeshchenii [Two-dimensional displacement detector]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2011, no. 5, pp. 166-167.

19. Slobodian S.M., Shishigin S.A. Ustanovka dlia sozdaniia i avtomaticheskoi registratsii ochagov opticheskogo probiia vozdukha [Device for formation and automatic record of optical air disruptive discharge focus]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2010, no 3, pp. 162-163.

20. Bukatyi V.I., Mishchenko N.I., Slobodyan S.M., Chaporov D.P. Measuring the distribution of radiation intensity in the cross section of a laser beam. *Instruments and Experimental Techniques*, 1976, vol. 19, no. 2, pt. 2. pp. 513-515.

21. Slobodyan S.M., Galakhov V.N., Sazanovich V.M. Dissector follower system for angular fluctuation measurement of an optical beam. *Instruments and Experimental Techniques*, 1980, vol. 23, no. 4, pt. 2, pp. 1010-1012.

22. Lukin V.P., Sazanovich V.M., Slobodyan S.M. Random image shifts during ranging in a turbulent atmosphere. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1980, vol. 23, no. 6, pp. 484-490.

23. Volkov V.F., Peshel' A.K., Slobodyan S.M., Tyryshkin I.S. Registration of a pulsed laser beam by a matrix of charge-coupled devices. *Instruments and Experimental Techniques*, 1981, vol. 24, no. 6, pt. 2, pp. 1522-1524.

24. Arutyunov V.F., Mel'nikov V.A., Slobodyan S.M., Chaporov D.P., Popov O.N. Sources measurement error of fast-flowing process parameters by charge-coupled devices. *Measurement Techniques*, 1983, vol. 26, no. 8, pp. 641-644.

25. Bol'shanin A.A., Slobodyan S.M., Yakovlev A.R., Vasil'eva L.A. Two-channel optical transducer for an industrial inspection system. *Measurement Techniques*, 1987, vol. 30, no. 10, pp. 954-956.

26. Slobodian M.S., Slobodian S.M. Konsol'nyi p'ezoprivod [Cantilever piezoelectric drives]. *Datchiki i sistemy*, 2003, no. 3, pp. 47-48.

27. Slobodian M.S., Slobodian S.M. Trekhkoordinatnyi p'ezoprivod []. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2004, vol. 47, no. 1, pp. 32-36.

28. Slobodian S.M., Iakovlev A.R. Bimorfnyi privod sistemy upravleniia [Bimorph drive of control system]. *Pribory i sistemy upravleniia*, 1988, no. 5, P. 51.

29. Slobodian S.M. Trianguliatsionnyi algoritm trekhmernogo peremeshcheniia zerkala upravliaemoi opticheskoi sistemy [Triangulation algorithm of the three-dimensional displacement of the mirror of controlled optical system]. *Metrologiia*, 2003, no. 8, pp. 29-38.

30. Slobodian S.M. Mnogomernokoordinatnyi privod mikroupravleniia [Multidimensional coordinate actuator of microcontrol]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2003, vol. 306, no. 5, pp. 92-95.

31. Slobodian M.S., Slobodian S.M., Tsupin A.A. Shirokoformatnyi lazernyi stvor [Large-format laser range]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 34-39.
32. Slobodyan M.S., Slobodyan S.M., Tsupin A.A. Optical deflector of a wave-front tilt corrector. *Journal Optical Technology*, 2008, vol. 75, no. 5, pp. 301-305.
33. Bol'shanin A.A., Slobodian S.M., Iakovlev A.R. Samoorganizatsiia lazernogo «awl-sight» pri navedenii ob"ekta [Self-organization laser «awl-sight» objective pointing]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 49-52.
34. Slobodian S.M. Lazernyi stvor s kontrolem vizual'nogo vospriiatiia [Control of radiation facility by visual laser alignment]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 1, pp. 25-29.
35. Deeva V.S., Slobodian S.M. Metod povysheniia tochnosti MP-datchikov [MP-sensor accuracy increasing method]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2014, no. 2, pp. 46-47.
36. Slobodian M.S. Upravlenie svoistvami soedinenii splavov tsirkoniia [Control properties of the connections of alloys zirconium: Book]. Tomskii politekhnicheskii universitet, 2006. 108 p.
37. Cherkesov G.N. Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov [The reliability of software and hardware systems]. Saint Petersburg: Piter, 2005. 479 p.
38. D'iakonov V.P. Simulink: samouchitel' [Simulink: Self-teaching guide]. Moscow: DMK-Press, 2013. 784 p.
39. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti [Basic of reliability theory]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006. 702 p.
40. Kel'ton V., Lou A. Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS [Simulation modelling. Classic CS]. Saint Petersburg: Piter; Kiev: BKhV, 2004. 847 p.
41. Lazarev Iu. Modelirovanie protsessov i sistem v MatLab [Modelling of processes and systems in MatLab]. Saint Petersburg: Piter; Kiev: BKhV, 2005. 512 p.
42. Morozov V.K., Rogachev G.N. Modelirovanie informatsionnykh i dinamicheskikh sistem [Information and dynamical systems modelling]. Moscow: Akademiia, 2011. 384 p.

Сведения об авторах

Деева Вера Степановна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Омского государственного технического университета (644050, Омск, пр. Мира, 11, e-mail: veradee@mail.ru, тел.: +7-3822-303-133).

Слободян Степан Михайлович (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор Омского государственного технического университета (644050, Омск, пр. Мира, 11, тел.: +7-9528867224, e-mail: sms_46@ngs.ru).

Слободян Михаил Степанович (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, ул. Ленина, 30, тел.: +7-3822-303-133).

About the authors

Deeva Vera Stepanovna (Omsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Omsk State Technic University (644050, Omsk, Mira ave., 11, e-mail: veradee@mail.ru, tel.: +7-3822-303-133).

Slobodyan Stepan Mikhailovich (Omsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical, Professor Omsk State Technic University (644050, Omsk, Mira ave., 11, тел. +79528867224, e-mail: sms_46@ngs.ru).

Slobodyan Mikhail Stepanovich (Tomsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenina ave., 30, tel.: +7-3822-303-133, e-mail: mss@tpu.ru).

Получено 20.04.2016